

Los sistemas de iluminación de los faros de la Antigüedad. El faro helenístico de Alejandría

Manuel Durán Fuentes

En estos últimos años ha habido un interés creciente sobre la existencia de máquinas en la antigüedad clásica para la producción de trabajos que sustituían a la fuerza humana o animal, a raíz del hallazgo de restos arqueológicos que lo demuestran. Ya se conocen bastantes máquinas de época romana accionadas por energía hidráulica, que ponen en duda la teoría de que la ‘abundante’ mano de obra esclava disponible fue un impedimento para la maquinización de los procesos productivos. Unos buenos ejemplos son el complejo molinero de Barbegal, cerca de la ciudad francesa de Arlés, descubierto desde antiguo pero que hasta 1940 no fue reconocida su función (Leveau 2007, 185–99), o los aserraderos de piedra de Gerasa (Jordania) identificado en 2002 (Seigne 2007, 243–57), y de Éfeso (Turquía) estudiado en 2007 (Mangartz 2007, 235–427). Conocemos con bastante detalle cómo eran estas sierras mecánicas por el hallazgo de un relieve labrado en el dintel de entrada de una tumba de Heliópolis (Turquía) (Grewe 2007, 227–34). También hace pocos años que se han descubierto los restos de la estructura del comedor giratorio que, según Suetonio (XXXI, 380), había en la *Domus Aurea* de Nerón en la colina romana del Palatino. Los arqueólogos responsables de estas excavaciones opinan que la plataforma giratoria estuvo accionada por una rueda hidráulica (Villedieu 2011, Villedieu 2015). Ante la curiosidad que nos despertó esta máquina hicimos una propuesta basada en la tecnología mecánica de la época, ajustadas sus posibilidades al limitado

abastecimiento de agua a la colina por el acueducto *Aqua Claudia* (Durán 2015).

En 2011 realizamos un trabajo sobre el faro romano de *Brigantium* en el que se propuso una máquina hidráulica que girase su luminaria (Durán 2011). Hemos seguido con nuestra curiosidad en el tema de las luces de los faros de la antigüedad y, con ocasión de este Congreso, exponemos una propuesta de un sistema mecanizado de accionamiento de la luminaria del Faro de Alejandría que redujese la mano de obra a las operaciones de provisión de combustible y mantenimiento. En una reciente publicación sobre «Las maravillas del mundo antiguo» (Manfredi 2016, 148–49), el autor cree en la posibilidad de que este faro tuviese una luminaria giratoria accionada con una máquina, ya que lo hacía viable la tecnología y el «fervor de inventiva» que tenían los sabios e ingenieros de Alejandría.

BREVE HISTORIA DEL FARO DE ALEJANDRÍA

La primera referencia está en el epigrama que Posidipo de Pela (310–240 a.C.) realizó con motivo de su inauguración (Fernández-Galiano 1987, 92) pero, a pesar de su magnificencia, no fue incluido en el listado de las maravillas del mundo hasta el que realizó el poeta Calamaco de Alejandría en el siglo VI d.C. No obstante, su imagen se reprodujo en el período clásico en múltiples soportes (mosaicos, vasos de vidrio, lapidas, sepulcros, joyas y monedas romanas) (Hairý



Figura 1
Infografía de la maquina hidráulica del faro de *Brigantium*
(Fernando Durán 2011)

2016, 19; Giardina 2010, 23–34). En algunas monedas romanas y en los vasos vítreos está atestiguada la existencia de dos cuerpos de forma nítida, mientras que otro más alto, el tercero, se aprecia con más dificultad pues parece que se trata de un zócalo o plataforma que sostenía una estatua. Los textos árabes hablan de un cuerpo redondo, pero Roddé (1979) cree que procedía de una recomposición del Faro dañado por los bizantinos o los terremotos antes de construirse una mezquita. Según este autor el fuego se realizaría en el 2º cuerpo pues, como se aprecia en alguna moneda (fig. nº 2), se trataría de un espacio abierto rematado por la citada plataforma sostenida por columnas (Roddé 1979, 845–872).

Fue construido por el faraón Ptolomeo I Soter (305–283 a.C.) y terminado por su hijo y sucesor Ptolomeo II Filadelfo en el año 279 a.C. Tuvo una inscripción en la que se mencionaba a Sostrato de Cnidos, rico súbdito y cortesano, que parece haber sido el promotor de la obra aunque no se descarta que también fuese su arquitecto (Clayton 1993, 114). Según Estrabón (XVII, I.6) la torre, construi-

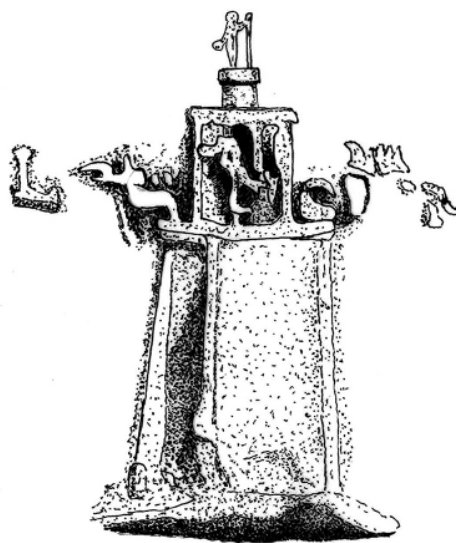


Figura 2
Grabado del Faro en una moneda de Domiciano (M. Durán)

da en piedra blanca y que se asentaba en el islote rocoso de Pharos, estaba unida a tierra por «un brazo de tierra llamado Heptastadio» con un puente que dejaba dos entradas para comunicar los dos puertos. Según el poeta Posidipo de Pela (310–240 a.C.) la torre corta «recta y tajante los aires, es visible de día desde infinitos estadios, mientras que de noche el navegante que vuela llevado por las olas podrá ver el gran fuego que arde en su cima...» (Fernández-Galiano 1987, 91–97). Flavio Josefo escribe en su libro «Las Guerras de los Judíos» que la luz de su llama, sostenida por «una torre muy grande», alcanzaba una distancia de 300 estadios (ca. 50 km), similar a la distancia del horizonte (2006, V, XI). Otras referencias relativas al Pharos las hallamos en las obras de Julio Cesar (2014, III, CXII), Plinio el Viejo (1998, XXXVI, 12) y Amiano Marcelino (2002, XXII, 16.7–9–10).

Una posible imitación hecha a escala con una fábrica de piedra es la Torre de Abu Sir construida sobre un cenotafio del dios Osiris, en las ruinas de la antigua ciudad de Taposiris Magna fundada por Ptolomeo II Filadelfo entre el 280 y 270 a.C., a unos 45 km al oeste de la ciudad de Alejandría. En este lugar se celebraba el ‘Khoiak Festival’ en honor a este dios. Pudo haberse construido a finales del siglo I

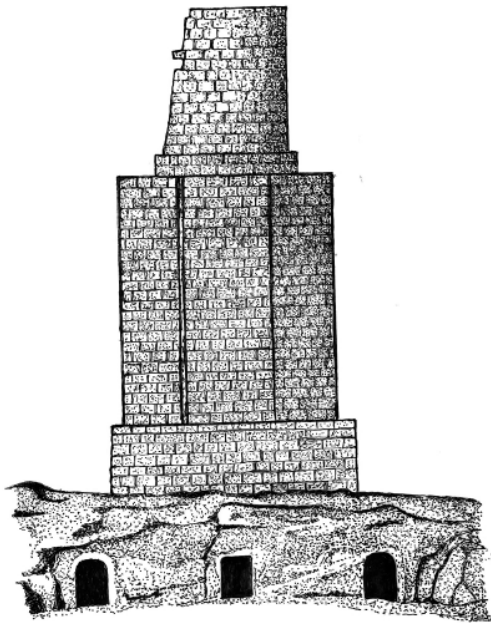


Figura 3
Torre de Abu Sir (Dibujo extraído de *Description de l'Egypte* por M. Durán)

a.C. y posteriormente haberse transformado en un faro (Clayton 1993, 121; Vörös 2004, 20 y ss.)

Los viajeros árabes que pasaron por Alejandría camino de su peregrinación a la Meca entre los siglos IX y XIV y que posteriormente relataron sus viajes aportan muchas informaciones y datos del Faro, completados con unos dibujos esquemáticos muy interesantes (Asín 1933; Empereur 1998, 40–3). De todos estos relatos el que parece que se ajusta a la reconstitución actualizada del Centro de Estudios Alejandrinos (CEAlex) es el del andalusí Abou Haggag Youssef Ibn Mohammed al-Balawi al-Andalusie, que visitó y midió el Faro en 1166 (Clayton 1993, 122–23, Asín 1935). Esta nueva reposición gráfica es más precisa que la realizada por el arqueólogo alemán Hermann Thiersch (1909) y por el arabista español M. Asín Palacios con la colaboración del arquitecto M.L. Otero (Asín 1933). Se ha basado en los hallazgos realizados en la bahía del puerto de Alejandría desde 1994, al pie del antiguo fuerte mameluco de Quat Bey, donde se han localizado los restos del Faro (Empereur 1998; Hairry 2006; Hairry 2016).

Tuvo tres cuerpos, el primero de planta cuadrada de 29,40 m de lado y 57,70 m de altura, con dos puertas, una en la primera plataforma y a escasos metros sobre el nivel del mar, orientada al norte hacia el mar (Empereur 1998, 98; Hairry 2006, 48; Hairry 2016, 23), y otra más pequeña y elevada orientada al sur, por donde se entraba al Faro por la rampa inclinada de acceso. El segundo cuerpo, de planta octogonal, pudo tener una altura de 29,40 m, y el tercero de planta circular 14,70 m de altura y una medida igual de diámetro (Hairry 2006).

De su interior sólo sabemos, no con mucha certeza, lo que se dice en los relatos árabes; hablan de la existencia de numerosas salas con bóvedas de voladizos sucesivos y losas, situadas a ambos lados de la rampa de subida, algunas con ventanas al exterior y destinadas a almacenes y para el alojamiento del personal de vigilancia y mantenimiento. Por ejemplo, por una inscripción funeraria del siglo II o III d.C., se sabe de una persona, el liberto Marco Aurelio Fileto, que fue un administrador (*procurator*) del faro (Giardina 2010, 62).

Según el iraquí Masudi (ca. 915–956) habían en la torre unas estatuas, una de las cuales emitía un sonido pavoroso que se oía a 2 o 3 millas para avisar de la presencia de naves enemigas. Otra estatua emitía sonidos armoniosos, que variaban cada hora e indicaban las horas del día y de la noche. En muchas monedas romanas está representada una estatua en la cima del Faro y otras estatuas que parecen representar unos tritones en la terraza del primer cuerpo.

La composición y algún detalle constructivo que conocemos justifican su supervivencia durante siglos en una zona donde son frecuentes los terremotos, a pesar del hándicap de su impresionante altura cercana a los 100 metros. De la relación de principios ‘antisísmicos’ establecidos por Kirikov para la construcción antigua, el Faro tenía una composición simétrica exterior y posiblemente interior, numerosas cámaras que aligeraban la masa total y una forma escalonada que bajaba su centro de gravedad (1992, p.92). La comprobada existencia de enlaces de plomo con forma de doble cola de milano entre los sillares de su fábrica le daba al edificio una trabazón dúctil muy favorable para resistir los terremotos. La extracción de estos enlaces en época árabe para reutilizar el plomo pudo disminuir esta trabazón y debilitar su resistencia sísmica.

LA ILUMINACIÓN DEL FARO

La construcción del Faro fue imprescindible para señalar y asegurar la entrada de barcos al Gran Puerto de Alejandría por los peligrosos bajíos rocosos de su bocana. Era de una gran ayuda para el intenso tráfico marítimo que desde el inicio de la época helenística se desarrolló en el Mediterráneo Oriental, que había convertido a Alejandría en una gran ciudad y en un centro comercial de primer orden donde se intercambiaban las mercancías de Oriente y Occidente. Por esto su función de torre de señalización nocturna fue fundamental aunque los barcos no entrasen en el puerto durante la noche, pues les permitía marcar el rumbo, acercarse a la costa y mantenerse a una cierta distancia de seguridad. R.J. Forbes, reconocido autor de estudios sobre tecnología antigua, plantea que el Faro no tuvo una iluminación hasta el siglo I d.C. y que en sus primeros años sólo fue un gran hito de señalización diurna de la ciudad y su puerto (Giardina 2010, 59).

Con independencia de cuando el Faro dispuso de iluminación nocturna, ¿cómo pudo haber sido? No

parece razonable que este Faro ni tampoco los grandes faros romanos, con unas construcciones tan esmeradas y de alturas importantes, fuesen construidos para hacer una hoguera en la cima. Este procedimiento tenía muchos inconvenientes por la gran cantidad de combustible necesario —en el caso que fuera madera— para que la llama tuviese la altura para verla a una cierta distancia. El fuego pudo hacerse en un brasero de buen tamaño similar a los que hubo en algunos faros europeos del siglo XVII y XVIII alojado en un recinto cerrado.

La luz fija de un fuego tenía un inconveniente como ya lo puso de manifiesto Plinio el Viejo (siglo I d.C.) al reconocer que los marineros lo puedan confundir con una estrella «*porque desde lejos las llamas parecen serlo*» (1998, XXXVI, XII, Vol. III, 176). Quizá conocía este problema por haber sido prefecto de la flota romana en Miseno, cargo al que fue nombrado por su amigo Vespasiano. Para solucionarlo los ingenieros pudieron idear y construir una luminaria móvil para que la luz fuese vista con una intensidad variable.

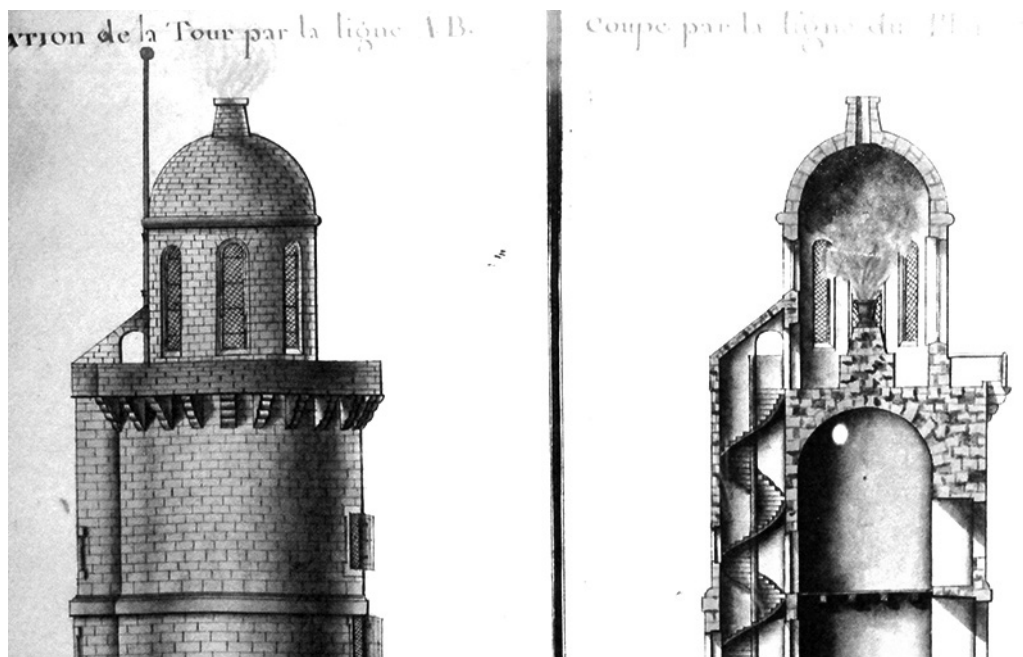


Figura 4
Grabado de un faro francés del siglo XVII con un brasero en su cima (Fotografía M. Durán 2012)

¿Tuvo el Faro de Alejandría una luminaria giratoria en época helenística? Creemos que sí pues con la llegada al poder de los Ptolomeos se asentaron en la ciudad muchos sabios e ingenieros mecánicos para trabajar en los recién construidos Museo y Biblioteca, y que traían la práctica y los conocimientos científicos y técnicos de los territorios conquistados por Alejandro el Magno. Una prueba de estas capacidades técnicas se halla en el papiro anónimo *Laterculi Alexandrini* en el que se nombran a los profesionales famosos y entre ellos «los mecánicos» como Abdaraxo, constructor de «la máquina de Alejandría». Se desconocen detalles de la misma, dónde estaba y para qué servía, pero podríamos preguntarnos si pudo ser la que había en el Faro.

Esta luminaria giratoria estaría formada por una estructura cilíndrica que portase un mechero con un depósito de combustible en su interior y un espejo reflectante del que hablan las narraciones de distintos cronistas. La forma cilíndrica del tercer cuerpo del faro justificaría la existencia de este bastidor giratorio (Russo 2015, 146).

El egipcio Ibn Wasif Saf (siglo XIII) relata que «en lo más alto de este faro había una cúpula de co-

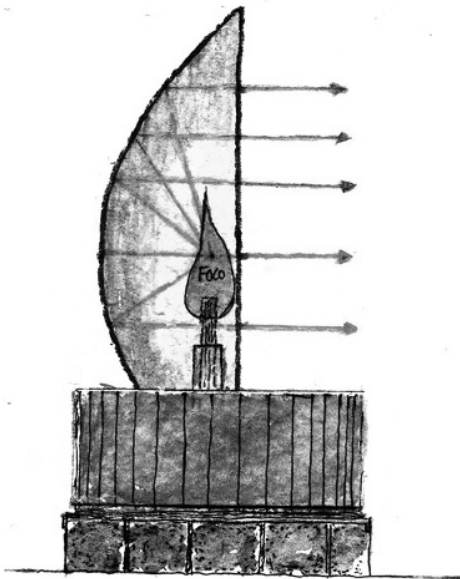


Figura 5
Espejo parabólico sobre el bastidor giratorio sobre un pedestal de piedra (M. Durán)

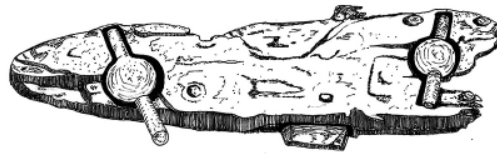


Figura 6
Rodamiento de esferas del barco de Calígula del lago Nemi (Italia) (M. Durán)

bre amarillo, sobre la cual estaba instalado un espejo, hecho de varios metales el cual se movía, gobernado con arte, sobre un asiento de cobre, movido también con arte» (Asín 1933, 282). Si tuviese este sistema de rodamiento estaría formado por dos planchas metálicas pulidas y engrasadas, una fija anclada a una base sobre la que giraría la otra que estaría acoplada a la base del bastidor. Podría haber otro tipo de rodamiento consistente en unas bolas de bronce con un eje en torno al cual girarían, distribuidas circularmente y ancladas en la base. Serían similares a las que poseía una plataforma giratoria del barco del Calígula (12–41 d.C.), cuyos restos se hallaron y recuperaron en el lago Nemi entre 1929 y 1931.

Al parecer estos rodamientos fueron usados en el comedor giratorio de Nerón (Villedieu 2011, 51).

En el mechero sería una especie de gran lucerna en cuyo interior se alojaría el líquido inflamable, con una mecha en la punta en la cual ardería la llama luminosa. Podría disponer de una rueda dentada en



Figura 7
Infografía sobre la posible máquina hidráulica del comedor giratorio de Nerón (Fernando Durán)



Figura 8
Lucerna depositada en el Museo Arqueológico de Trípoli (Libia) (M. Durán)

contacto con la mecha que permitía ir extrayéndola del interior del depósito de aceite, a medida que se consumiera. Un dispositivo similar lo describe Herón (Woodcroft 1851, 42). El tipo de combustible empleado sería aceite de oliva o elaborado a partir de plantas oleaginosas, o una grasa animal (Romer 1996, 87; Clayton 1993, 117). El aceite vegetal era el que habitualmente se usaba para el alumbrado con lucernas; en ocasiones se mezclaba con sal para evitar la producción de humo (Golvin 1987, 51).

La existencia de un espejo fue imprescindible para que la luz del Faro se viese a una gran distancia (Sánchez 1991, 24), ya que su intensidad lumínica se conseguía gracias a la reflexión y no por la fuerza del foco luminoso. Estaría construido por una o varias placas metálicas pulidas de un tamaño desconocido pero que suponemos que fue relativamente grande. Los cronistas árabes le dan un diá-

metro entre 1,15 a 3,68 m. La construcción de este espejo parabólico era posible no sólo desde el punto de vista teórico sino por la práctica de los mecánicos alejandrinos. La teoría científica de los espejos estaba asentada en los estudios de geometría y óptica, de Euclides, Arquímedes y Apolonio de Perge que fue el primero que habló de la elipse, la parábola y la hipérbola en su obra «Sobre las secciones cónicas». También fueron fundamentales los estudios del alejandrino Dositeo y de Diocles sobre la forma parabólica y las propiedades del «espejo ardiente» de reflejar la luz situada en el foco en un haz de rayos luminosos paralelos al eje de la parábola, o lo que es lo mismo, si los rayos del sol se proyectaran sobre el espejo se reflejarían y concentrarían en el foco convirtiéndose en un punto «ardiente». Solo se conocen los trabajos de Diocles (siglo II a.C.-I d.C.) gracias a una copia de época árabe (Rashed 2002, 6). Se cree que Arquímedes construyó un espejo ardiente para incendiar las naves romanas que asediaban Siracusa, aunque pero lo han considerado como una leyenda por la dificultad de concentrar la luz solar en un punto del barco y conseguir prenderle fuego. Últimamente se ha planteado que podía haberlo conseguido con una gran superficie reflectante formado por muchos espejos planos más pequeños, que se orientaban a mano para concentrar la luz reflejada en un punto concreto y así prenderle fuego (Thuillier 1990, 45–76).

LA LUMINARIA GIRATORIA

El giro de la luminaria sería un movimiento circular medido y constante, de unos 180° que se produciría por la acción de dos fuerzas horizontales y tangenciales transmitidas por unas sogas amarradas a su bastidor y enrolladas en él en sentido contrario. De una de las sogas cuelga un pistón, después de cambiar de dirección al pasar por un cilindro giratorio, y de la otra pende un contrapeso.

¿Qué tipo de energía se emplearía en el trabajo de arrastre de las citadas sogas? En la antigüedad la fuerza para efectuar un trabajo fue bien la humana o animal, o la generada por el agua (energía hidráulica). Tal como se plantea la maquinaria del Faro, ninguna de ellas nos parece adecuada para realizar el trabajo de girar la luminaria, por lo que la única energía alternativa sería la calorífica o térmica.

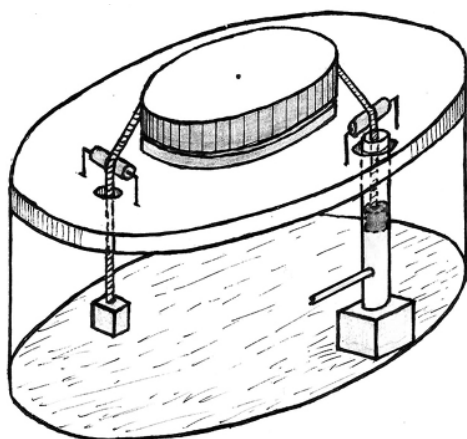


Figura 9
Sistema de arrastre del bastidor mediante dos sogas (M. Durán)

¿Es posible que hubiese una ‘máquina de vapor’ en el Faro de Alejandría? A pesar de la incredulidad que genera esta pregunta, así lo creemos ya que a partir de finales del siglo III a.C. se conocían las bases teóricas y los elementos mecánicos necesarios para su construcción. El alejandrino Ctesibio (280–220 a.C.) experimentó con la compresión de los fluidos (Vitruvio X, VII, 4) aplicándola en una catapulta cuya fuerza de propulsión se generaba por la compresión del aire en dos cilindros metálicos con pistones y en la construcción de un gran proyectil impulsado por aire comprimido, que no llegó a fabricar totalmente (Vegecio, 68). Parece ser que el acabado interior de los cilindros y pistones aseguraba tan bien la estanqueidad entre ellos a una presión alta que, según Filón de Bizancio, se producían chispas por la fricción entre ellos (Russo 2015, 135). En el tratado ‘Pneumática’ de Herón de Alejandría (siglo I d. C.) está incluido un artilugio, el ‘aelipilo’, que consistía en una bola sostenida en un bastidor por un eje horizontal y dos tubos diametralmente opuestos y curvados; al calentarse el agua contenida en su interior el vapor de agua generado provoca el giro de la bola por la reacción de fuerzas desequilibradas (Woodcroft 1851, 53; Shelton 1956, 53–4). Un poco más sofisticado es el dispositivo ideado para abrir y cerrar las puertas de un templo al encender y apagar el fuego sobre un altar hueco que eleva la temperatura del aire contenido en su interior y su expansión provoca

una serie de acciones a través de un depósito de agua, un sifón y dos sogas enrolladas en unos rodillos verticales (Woodcroft 1851, 45). También Arquímedes (287–212 a.C.) manejó el vapor de agua en la construcción de un cañón utilizado en la defensa de Siracusa, asediada por la flota romana. Unos siglos más tarde Leonardo da Vinci recreó, al menos gráficamente, dicho cañón, que constaba de un horno calentado con carbón colocado en la culata y cuando el metal estaba muy caliente se introducía agua en su interior que rápidamente se convertía en vapor que se expandía y proyectaba la bola; al parecer disparaba una bola de unos 30 kg a 1000 m de distancia (Rossi 2010, 115–16).

El arqueólogo y submarinista Jean-Ives Empereur, director del Centre d’Études Alexandrines (CEAlex) declaró hace unos años que fue posible que en Alejandría hubiese mecanismos de vapor que moviesen autómatas, *«aunque no podemos estar del todo seguros a ese respecto»* ya que no se han hallado restos de ellos (Sierra 2008, 198–201).

MÁQUINA DE VAPOR

Los motores más primitivos fueron movidos por energía hidráulica y quizá esta práctica condujo a los técnicos helenísticos a la generación de una nueva energía, la térmica, que aprovechaba su transformación en vapor de agua al ser calentada así como las variaciones de volumen acaecidos durante los cambios de fase que permitían un control más fácil de las máquinas sencillas. Por tanto se trataría de una máquina de vapor de combustión externa que utilizaba la producción de vapor de agua a presión para desplazar un pistón dentro de un cilindro. Sería una máquina de ‘simple efecto’ ya que el vapor actuaría sobre el pistón ‘sin expansión’ con una fuerza constante a lo largo de su recorrido y ‘sin condensación’ ya que sólo dejaría escapar el vapor a la atmósfera una vez que hiciese toda la carrera.

Dispondría de un horno con una caldera en la parte superior en la que habría agua que, por el calor generado, entraría en ebullición convirtiéndose en vapor. ¿Cuál sería el carburante usador? No creemos que fuese la madera ni ningún aceite vegetal o animal, pues parece más adecuado el uso de un betún resinoso (pez), carbón vegetal o un betún asfáltico. Ninguno de estos productos estaba ausente en Egipto pues

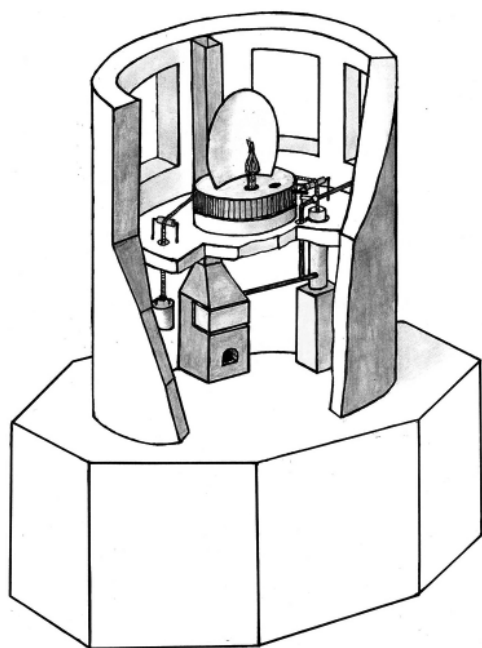


Figura 10
Sistema de accionamiento mecánico para mover la luminaria (M. Durán)

desde antiguo está acreditado no solo su aplicación en distintos usos sino también su procedencia y aprovisionamiento. Para Egipto era un producto estratégico importado desde el IV milenio de los yacimientos del Mar Muerto, de gran pureza y fácil de extraer, que históricamente tuvieron bajo su control para asegurar su suministro. Otros manantiales eran abundantes en varios lugares de Siria e Irak, y de ellos procedía, desde el Neolítico, el betún empleado en los países del Próximo Oriente. Este uso está acreditado en antiguas tablillas sumerias en escritura cuneiforme (Connan 2012, 83–5) y en el libro del Génesis de la Biblia con referencias a los lugares donde manaban (14.10) y los usos (11.3). También pudo emplearse un aceite procedente del refinado del betún sólido por fusión y goteo (el *distillatio per descensorium* de los alquimistas medievales) (Forbes 2012, 255). El empleo del betún como combustible está recogido en algunos textos clásicos, por ejemplo el uso, mezclado con azufre, en las Guerras del Peloponeso de finales del siglo V a.C. (Tucídides 2014, II, 77). Qui-

zá era una mezcla similar a la que se llamó ‘fuego griego’ que ardía en contacto con el agua (León 2011, 316–7). También hay referencias a su uso en la iluminación y para calentar hornos (Forbes, 1964, V, I, 85). Según Dioscórides Anazarbeo (40–90 d.C.) en Agrigento había unas fuentes de betún líquido que usaban en los candiles en lugar del aceite (Connan 2012, 75), y el bizantino Cóndino se refiere a un ‘fuego medo’ usado para caldear dos termas construidas en tiempos de Septimio Severo y que se conservaba en unas vasijas de cristal (León 2011, 161). Había betunes de dos tipos, uno ‘seco’ muy abundante en Babilonia, y otro ‘líquido’ que llamaban nafta y que tenía la particularidad que «si se aproxima al fuego se prende, y si un cuerpo ungido de ella se aproxima al fuego, se inflama; y no es posible apagar este fuego con agua...» (Estrabón XVI, 1.15).

El vapor generado se acumulaba en la parte superior de la caldera y en la tubería de conexión con el pistón, y a medida que aumentaba su cantidad se incrementaba la presión hasta el momento en el que se alcanzaba la suficiente para desplazar el pistón en un cilindro vertical. Cuando asciende el pistón bajaría el contrapeso cuya energía potencial se transformaría en el trabajo que giraría el bastidor de la luminaria. Para reducir su velocidad angular y mantenerla constante se tendría que frenar el bastidor por rozamiento con una pieza que lo presionaría de un modo variable. Cuando este giro se parase al llegar a un tope, después de un giro de 180° el contrapeso dejaría de bajar y el pistón llegaría a su posición más alta. Antes de llegar al final de este giro, un brazo saliente del bastidor desplazaría el mando de accionamiento de una válvula de mariposa alojada en la tubería del circuito del vapor a presión, la abriría permitiendo la salida del vapor y la pérdida de la presión sobre el pistón por lo que descendería. En esta fase sería su energía potencial la que se transformaría en el trabajo de girar el bastidor de la luminaria y en el de subir el contrapeso, que sería posible ya que el peso del pistón sería superior al del contrapeso. El bastidor rotaría en sentido contrario y al completar el giro de unos 180°, se frenaría al llegar a un nuevo tope; en este momento el pistón alcanzaría la parte baja de su carrera y el contrapeso su cota anterior. Igualmente un momento antes de la finalización de este nuevo giro, otro brazo saliente cerraría la mencionada válvula de mariposa, por lo que el vapor de agua generado de forma continua en la caldera podría acumularse de

nuevo e incrementar su presión, reproduciéndose un nuevo ciclo de los dos giros descrito.

Destacamos dos hechos que se derivan de este proceso y que, al parecer, se producían en el Faro: el primero es la emisión continuada de humo a lo largo de las 24 horas del día, pues durante la noche la máquina de vapor estaría funcionando y durante el día exclusivamente se mantendría el fuego. El segundo sería el escape periódico de vapor de agua que conducido a través de una tubería y derivado a las bocas de los tritones su salida podría provocar un sonido en las lengüetas instaladas en ellas.

UNA APROXIMACIÓN A LA JUSTIFICACIÓN NUMÉRICA DE LA MÁQUINA PROPUESTA

El peso total de la luminaria compuesto por un bastidor cilíndrico de madera de unos 1,25 m de radio y 1,00 m de altura, el mechero y su depósito de aceite y el espejo metálico de unos 4,00 m de diámetro podría alcanzar ser de unos 4,6 t (46.000 N).

Se ha considerado que el giro de la luminaria se produciría entre dos láminas metálicas, quizá de bronce, lubricadas con aceite entre ellas, por lo que consideró un coeficiente de rozamiento estático de 0,10. Según Vitrubio las bombas de pistones de Ctesibio se engrasaban con aceite (X, VII).

El valor del contrapeso P_c sería aquel que venciese la fricción entre las dos láminas metálicas F_f generada por el peso de la luminaria. Se considera que la aceleración del descenso del contrapeso es muy pequeña por el mencionado frenado y la masa de la polea intermedia, necesaria para el cambio de dirección de la sogas que las une, prácticamente despreciable. Por lo tanto la fuerza horizontal de la sogas sobre el armazón T_1 sería igual a la gravitatoria del contrapeso, $P_c = T_1$, y esta fuerza T_1 es la única que actuaba en el giro de la luminaria y para ello su momento con respecto al eje vertical del armazón habría de superar el momento de fricción M_f entre las planchas metálicas:

$$\begin{aligned} M_f &< T_1 \cdot 1,25 \\ M_f &\sim 3000 \text{ N} \cdot \text{m} \\ T_1 &= P_c \geq 2400 \text{ N} (0,24 \text{ t}) \end{aligned}$$

Mientras tanto el calor generado en el hogar pondría en ebullición el agua de la caldera, generando vapor de agua de forma continua, transformándose

cada unidad de volumen de agua en 1.300 volúmenes de vapor en su punto de ebullición. La presión del vapor generada actuaría sobre la superficie del pistón S_p con una fuerza F_p que lo elevaría, venciendo su peso P_p y la presión atmosférica.

Cuando el pistón llega a su punto más alto en el interior del cilindro (longitud de la carrera es igual a la longitud del semicírculo del armazón, unos 4,00 m), el contrapeso habría llegado a su punto más bajo después de descender una altura similar de 4,00 m. El armazón ha girado frenado 180° en un sentido, en un tiempo, por ejemplo, de una media hora. Si en este momento se abría la válvula de mariposa para dejar salir el vapor de agua, por lo que la presión bajaría hasta la atmosférica. El peso del pistón lo haría descender arrastrando el armazón que giraría en sentido contrario y el contrapeso elevándolo.

Se considera que la aceleración del descenso del pistón sería muy pequeña por el mencionado frenado y la masa de la polea intermedia, necesaria para el cambio de dirección de la sogas que las une, prácticamente despreciable; por tanto la fuerza aplicada en el armazón T_2 sería igual al peso del pistón P_p :

$$\begin{aligned} P_p &= T_2 \\ P_p &= 2500 \text{ N} (0,25 \text{ t}) \\ M_f &= 3000 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$T_2 \cdot 1,25 > M_f + P_c \cdot 1,25 \rightarrow T_2 = P_p \geq 4.900 \text{ N} (0,49 \text{ t})$$

La fuerza F_v para elevar un pistón de bronce de 40 cm de diámetro y 0,45 m de altura ($P_p=4970 \text{ N}$) la presión del vapor de agua p_v tendría que ser:

$$\begin{aligned} (K_{\text{eficiencia}} \cdot p_v) \cdot 0,785 \cdot 0,40^2 &\geq 4.970 + P_{\text{atm}} \cdot 0,785 \cdot 0,40^2 \\ p_v &\geq 354.000 \text{ N/m}^2 (3,54 \text{ atm}) \end{aligned}$$

Es un valor relativamente pequeño para que la caldera, el cilindro del pistón y la caldera pudiesen resistirla, bien a base de planchas metálicas o tableros de madera reforzados por aros metálicos.

LISTA DE REFERENCIAS

Amiano Marcelino 2002. *Historia*. Edición M^aL. Harto Trujillo. Madrid: Ediciones Akal.

- Asín Palacios, M. 1933. Una descripción nueva del faro de Alejandría. *Al-Andalus*, 1:241–300. Madrid-Granada.
- Asín Palacios, M. 1935. Nuevos datos sobre el faro de Alejandría. *Al-Andalus*, 3:1, 185–193. Madrid-Granada.
- Bordresen, K. 2010. *Las Siete Maravillas del mundo antiguo*. Madrid: Alianza Editorial.
- Brian Radka, L. 2006. *The electric mirror on the Pharos lighthouse and other ancient lighting*. Ed. Larry Brian Radka.
- Butterworth, A.; Lawrence, R. 2007. *Pompeya. La ciudad viva*. Madrid: Editorial Santillana.
- Clayton P.; Price, M.J. 1993. *Les sept merveilles du monde*. París: Ed. Gallimard.
- Connan, J. 2012. *Le bitume dans l'antiquité*. Arlés: Éditions Errance.
- Durán Fuentes, M. 2011. Faros de Alejandría y *Brigantium*: propuestas de reconstitución formal, estructural y de funcionamiento de la luminaria de la Torre de Hércules de A Coruña. En *Actas VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Santiago de Compostela. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Durán Fuentes, M. 2015. Los mecanismos hidráulicos romanos. Hipótesis sobre la luminaria del Faro de *Brigantium* y el comedor giratorio de la *Domus Aurea* de Nerón. *Actas IX Congreso Nacional y I Hispanoamericano de Historia de la Construcción*. Segovia. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Empereur, J.-I. 1998. *Le Phare d'Alexandrie. La Merveille retrouvée*. París: Ed. Gallimard.
- Estrabón. 2015. *Geografía, XV-XVII*. Madrid: Biblioteca Clásica Gredos.
- Fernández-Galiano, E. 1987. *Posidipo de Pela*. Madrid: Instituto de Filología, CSIC.
- Flavio Josefo. 2006. *Las Guerras de los Judíos*. Biblioteca Virtual Universal, www.biblioteca.org.ar.
- Fleury, Ph. 1996. Les sources alexandrines d'un ingénieur romain au début de l'Empire. *Actes du Colloque International de Saint-Étienne. Université de Saint-Étienne*.
- Forbes, R.J., 1964. *Studies in ancient technology*. Vol. I-II. Ed. E.J.Brill, Holanda.
- Forbes, R.J., 2012. Química, culinaria, cosmética. En *Storia della Tecnologia, Vol. 1*. Turin: Bollati Boringhieri Editore.
- Giardina, B. 2010. *Lighthouses from Antiquity to the Middle Ages*. BAR International Series 2096. Oxford.
- Gille, B. 1978. *Les mécaniciens grecs. La naissance de la technologie*. París: Éditions du Seuil.
- Golvin, J.-C.; Goyon, J.-C. 1987. *Les bâtisseurs de Karnak*. Presses du CNRS. Francia.
- Grewe, K.; Kessenere, P. 2007. A stone relief of a water-powered stone saw at Hierapolis, Phirgia. A first consideration and reconstruction attempt. *Energie Hydraulique et machines élévatrices d'eau durant l'antiquité*. Centre Jean Bérard. Pont du Gard. Francia.
- Hairy, I. 2006. Le Phare d'Alexandrie concentré de géométrie. *Revista Arqueologie*, n° 394. Dijon: Ed. Faton.
- Hairy, I. 2016. Le Phare. Lumière d'un empire sur le monde. *Revista Dossiers ARCHÉOLOGIE* n° 374. Dijon: Ed. Faton.
- Herodoto. 1989. *Los nueve libros de la Historia*. Madrid: Editorial EDAF.
- Hutter, S. 1991. *El faro romano de La Coruña*. A Coruña: Ediciós do Castro.
- Julio César. 2014. *La Guerra Civil*. Trad. Vicente López Soto. Barcelona: Editorial Juventud.
- Kirikov, B. 1992. *History of earthquake resistant construction*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Madrid.
- Landels, J.G. 2000. *Engineering in the ancient world*. University of California Press.
- León, V. 2011. *El cadáver de Alejandro*. Barcelona: Editorial Ariel.
- Leveau, P. 2007. Les moulins de Barbegal 1986–2006. En *Energie Hydraulique et machines élévatrices d'eau durant l'antiquité*. Centre Jean Bérard. Pont du Gard. Francia.
- Manfredi, V.M. 2016. *Las Maravillas del Mundo Antiguo*. Barcelona: Editorial Grijalbo. Barcelona.
- Mangartz, F. 2007. The byzantine hydraulic stone cutting machine of Ephesos (Turkey). A preliminary report. *Energie Hydraulique et machines élévatrices d'eau durant l'antiquité*. Centre Jean Bérard. Pont du Gard. Francia.
- Mercadé, J. 1952. Sur quelques représentations nouvelles du phare d'Alexandrie. *Bulletin de correspondance hellénique*, V. 76.
- Plinio Segundo, C. [1576] 1998. *Historia Natural*. Traducida y anotada por el Dr. Francisco Hernández. Universidad Nacional de México. Madrid: Visor Libros.
- Piponnier, D. 1983. La restauration du vase de Begram dit «au Phare d'Alexandrie». *Arts Asiatiques*, T.38.
- Quet, M.-H. 1984. Pharos. En *Melanges de l'Ecole Française de Rome. Antiquité T.96*, n° 2. Roma.
- Rashed, R. (trad.) 2002. *Les catoptriciens grecs. Les miroirs ardents*. París: Les Belles Lettres.
- Reddé, M. 1979. La représentation des phares à l'époque romaine. *Melanges de l'Ecole Française de Rome. Antiquité T.91*, n° 2. Roma.
- Romer, J.; Romer, E. 1996. *Las 7 maravillas del mundo. Historia, leyendas e investigación arqueológica*. Barcelona: Ediciones del Serbal.
- Rossi, C. 2010. Archimedes' cannons against the roman fleet? *The Genius of Archimedes-23 Centuries of Influence on Mathematics, Science and Engineering*. Proceedings of an International Conference held at Syracuse, Italy, June 8–10, 2010. New York: Springer.
- Russo, F. 2013. Il genio degli antichi/2. Idee, macchine e prodigi che hanno cambiato il mondo. En *ARCHEO Monografia* n° 5. Roma.
- Russo, L. 2015. *La rivoluzione dimenticata. Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna*. Milán: Universale Economica Feltrinelli.

- Sánchez Terry, M.A. 1987. *Faros españoles del Océano*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.
- Seigne, J.; Morin, T. 2007. Une scierie hydraulique du VI siècle à Gerasa (Jerash, Jordanie). Remarques sur les prémices de la mécanisation du travail. *Energie Hydraulique et machines élévatrices d'eau durant l'antiquité*. Centre Jean Bérard. Pont du Gard. Francia
- Shelton et alii, 1956. *Engineering in History*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Sierra Albert, J. 2008. *En busca de la Edad de Oro*. Barcelona: Editorial DeBolsillo.
- Stevenson, A. 1850. *History, Construction and illumination of lighthouses*. London: John Weale.
- Suetonio 2006. *Vida de los doce cesares*. Traducción y edición Alfonso Cuatrecasas. Madrid: Colección Austral nº 539.
- Thiersch, H. 1909. *Pharos antike islam und occident. Ein Beitrag zur architekturgeschichte*. Edición facsímil. Leipzig und Berlin: Druck und Verlag Von B.G. Teubner.
- Thuillier, P. 1990. *De Arquímedes a Einstein. Las caras ocultas de la invención científica*. Madrid: Alianza Editorial.
- Tucídides. 2014. *Historia de la Guerra del Peloponeso*. Trad. A. Guzmán Guerra. Madrid: Alianza Editorial
- Van Berchem, M. 1894–1903. Chateau du sultan Qayt-Bây a Elexandrie. Burdj Az-Zafar ou Pharillon, sur les fondations du phare Antique. En *Materiaux por un «Corpus inscriptionum arabicum»* nº 320. Egipto.
- Vázquez Ruiz, J. 1949. Nuevos datos sobre el faro de Alejandría. En *Boletín de la Universidad de Granada*, nº 87. Granada
- Vegecio Renato, F. 2010. *Compendio de técnica militar*. Edición y traducción David Paniagua Aguilar. Madrid: Ediciones Cátedra.
- Villedieu, F. 2011. Une construction néronienne mise au tour sur le site de la Vigna Barberibi: la *cenatio rotunda* de la *Domus Aurea*? En *Neronia Eletronica. Revue électronique*. Fascicule 1.
- Villedieu, F. 2015: Vigna Barberini (Palatin, Rome). Campagne de fouilles 2014. En *Chronique des activités archéologiques de l'École Française de Rome*. Roma
- Vörös, G. 2004. *Toposiris Magna 2998–2004*. Budapest: Egypt Excavation Society of Hungary.
- Woodcroft, B. 1851. *The pneumatics of Hero of Alexandria*. 2nd edición. Edición facsímil. London

